

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Aditivní technologie výroby
Additive Technology of Production

Student: Jakub Jakeš

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petruš, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Jakeš**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Aditivní technologie výroby
Additive Technology of Production**
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše na téma aditivní výroby.
2. Využití aditivních technologií výroby v praxi.
3. Využitelné práškové kovy pro aditivní výrobu.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení aditivní výroby.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
- [4] STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě16. 5. 2016.....

..........
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16. 5. 2016


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Jakeš

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bratřikovice 32, 747 52

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JAKEŠ, Jakub. *Aditivní technologie výroby: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 46 s. Vedoucí práce doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Bakalářská práce se formou rešerše zabývá aditivními technologiemi výroby, konkrétně 3D tiskem práškového kovu a laserovým navařováním. V úvodním textu práce jsou popsány základní technologie umožňující tuto výrobu a jednotlivá výrobní zařízení dostupná na tuzemském trhu. Následuje popis potřebného příslušenství těchto strojů spolu s návrhem celé výrobní laboratoře dle daných bezpečnostních pravidel. Dále se práce zabývá softwarovým vybavením výrobních strojů a rozбором jednotlivých práškových kovů použitelných v této oblasti výroby. Závěrem jsou v práci uvedené jednotlivé aplikace výroby kovovým 3D tiskem.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JAKEŠ, Jakub. *Additive Technology of Production: bachelor thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 46 p. Thesis head doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

This bachelor thesis in form of research deals with additive manufacturing technologies, in particular 3D printing of metal powder and laser sintering. In the introductory part the basic technologies enabling this manufacturing are described as well as individual manufacturing equipment available on the domestic market. Following is a description of the necessary accessories to these machines together with a proposal of an entire manufacturing laboratory in accordance with relevant safety rules. The thesis is also concerned with software equipment of the manufacturing machinery and an analysis of individual metal powders that are applicable in this area of manufacturing. In conclusion single applications of metal 3D printing manufacturing are mentioned.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
ÚVOD.....	8
1. ÚVOD DO RAPID PROTOTYPING	9
2. HLAVNÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU PRÁŠKOVÝM KOVEM.....	10
2.1 Selective Laser Sintering	10
2.2 Direct Metal Laser Sintering	11
3. ZAŘÍZENÍ PRO LASEROVÉ SPÉKÁNÍ KOVU DOSTUPNÉ V ČR	13
3.1 Stroje společnosti EOS GmbH.....	14
3.2 Stroje společnosti Concept Laser GmbH	16
3.3 Stroje společnosti Renishaw PLC	19
3.4 Příslušenství výrobního zařízení	21
3.5 Realizace a zabezpečení výrobní laboratoře	22
3.6 Software 3D tiskáren.....	26
3.6.1 Materialise Magics, nejpoužívanější software	26
3.6.2 3Shape CAMbridge software	30
4. VYUŽITELNÉ PRÁŠKOVÉ KOVY PRO ADITIVNÍ VÝROBU	31
4.1 Výroba práškového kovu	31
4.2 Používané práškové kovy a jejich tepelné zpracování	32
4.3 Trh s práškovými kovy	34
5. APLIKACE VÝROBY ADITIVNÍMI TECHNOLOGIEMI	35
5.1 Využití kovového 3D tisku v automobilovém a leteckém průmyslu.....	36
5.2 Další využití kovového 3D tisku v praxi	38
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ATEX	–	certifikace pro zařízení do výbušného prostředí
CAD	–	počítačem podporovaný návrh
CAM	–	počítačem řízená výroba
CO ₂	–	oxid uhličitý
DMLS	–	technologie řízeného spékání kovu laserem
ESD	–	elektrostatický náboj
FDM	–	technologie tavení plastu ve formě vlákna
MJM	–	technologie tryskového modelování
SGC	–	technologie oříznutí nanesené vrstvy
SLA, SL	–	stereolitografie
SLS	–	technologie selektivního spékání laserem
STL	–	standartní triangulační jazyk, formát souboru
LOM	–	technologie na principu laminování
RP	–	Rapid Prototyping
3D	–	trojrozměrný
x,y,z	–	souřadnicový systém

ÚVOD

Jako synonymum aditivní výroby byl donedávna používán starší výraz Rapid Prototyping označující technologie sloužící k výrobě prototypů. Díky rozsáhlému pokroku v tomto odvětví a vzniku nových technologií vycházejících z RP, již tyto technologie nezahrnují pouze prototypovou výrobu, a tak je vhodnější použití obecného termínu: Aditivní technologie výroby. Ten zahrnuje veškeré technologie pracující na principu postupného budování součásti nanášením jednotlivých vrstev materiálu, tzv. 3D tisku.

Dnes už 3D tisk čím dál více promlouvá do současné výroby, kde nabízí spoustu nových možností a značných výhod, které zlepšují a modernizují dosavadní výrobu. V oblasti strojírenského průmyslu hraje tato technologie významnou roli především díky možnosti tisku kovových dílů, kde otvírá zcela nový pohled na způsob návrhu konkrétní součásti a její samotné výroby.

Cílem této bakalářské práce je shromáždit dostupné informace o technologii kovového 3D tisku a vytvořit tak ucelenou rešerši, která bude obsahovat veškeré důležité aspekty této výroby.

1. ÚVOD DO RAPID PROTOTYPING

Rapid prototyping, tedy soubor technologií pro výrobu prototypů pomocí 3D tisku, nachází v dnešní době čím dál větší uplatnění a to nejen ve strojírenském průmyslu, ale i v mnoha dalších odvětvích. S novými technologiemi 3D tisku není výhradou pouze výroba prototypů, které většinou slouží k nalezení chyb ve výrobní dokumentaci, ověření vyrobitelnosti či posouzení funkčnosti a designu, ale taky výroba hotových dílů, které není možno běžnými výrobními technologiemi vyrobit.

Technologie 3D tisku kovů jsou využívány už více než dvacet let. Ovšem pokrok a modernizace těchto technologií, výrobních strojů a softwarů v posledních letech ukazuje, že jsou tyto způsoby výroby velice efektivní a v budoucnu budou hrát nejen ve strojírenské výrobě důležitou roli. [1, 2]

Obecné rozdělení základních technologií Rapid prototyping včetně materiálu, který se pro danou technologii používá, je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení metod Rapid prototyping [2]

Základní technologie RP	Zkratka	Materiál
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonát
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, fotopolymer

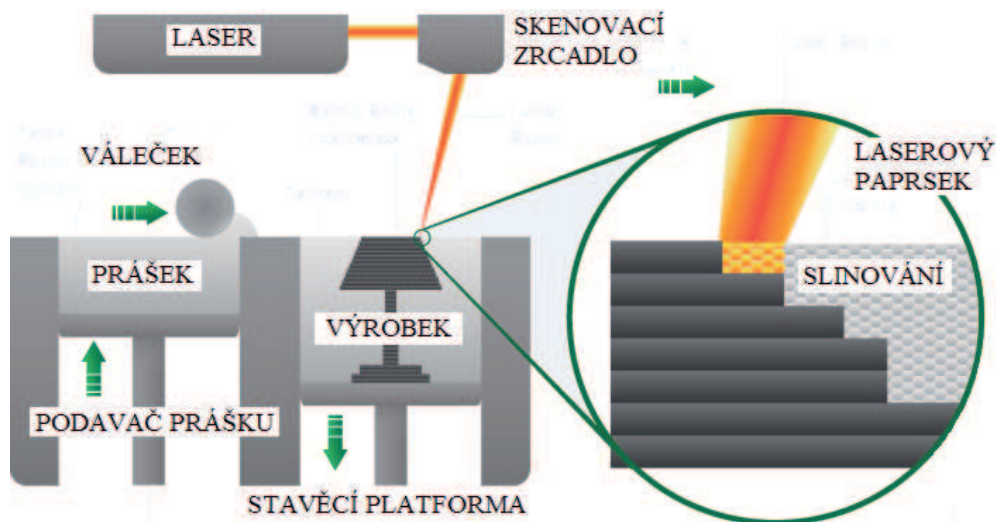
Možnost používání práškového kovu ve 3D tisku technologiemi **Selective Laser Sintering** a **Direct Metal Laser Sintering** otvírá zcela nové možnosti strojírenské výroby, které si uvědomují i výrobci v Evropě. Není tedy divu, že se tyto technologie dostaly i do České republiky, kde se začínají rovněž používat.

2. HLAVNÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU PRÁŠKOVÝM KOVEM

Pro tyto technologie je charakteristická tvorba součástí přímo z 3D CAD programů, kdy je model výrobku rozdělen pomocí speciálního softwaru do několika vrstev, ve kterých je zobrazena přesná geometrie průřezu součásti. Zařízení pro 3D tisk pak staví součást vrstvu po vrstvě za podmínek udávaných jednotlivými technologiemi tisku. U obou technologií je jako výchozí materiál pro vyhotovení součásti používán jemný prášek.

2.1 Selective Laser Sintering (selektivní spékání laserem)

U této technologie vzniká výrobek tavením práškového materiálu (kov, plast, keramika, sklo) v požadovaném místě pomocí vysoce výkonného CO₂ laseru. Dále je na stavěcí platformu stroje nanесena tenká vrstva prášku, kterou stroj předehřeje na teplotu blízkou jeho bodu tání. Důvodem předehřevu je zvýšení efektivity laseru. Jakmile laser osvítí určenou plochu vrstvy, stavěcí platforma klesne o hloubku jedné vrstvy a pomocí speciálního válečkového mechanismu je na platformu nanесena další vrstva prášku. Tento proces spékání se opakuje až do kompletního vyhotovení součásti. Z důvodu ochrany jakosti povrchu při spékání, je pracovní komora stroje hermeticky uzavřena a naplněna inertním plynem, kterým bývá dusík nebo argon. Princip technologie selektivního spékání laserem je popsán na Obr. 1.



Obr. 1: Princip technologie SLS [3]

Nezbytnou součástí tohoto výrobního procesu je aplikace dokončovacích operací. Jedná se o tryskání, kdy dojde k odstranění usazenin prášku z povrchu součásti, případné obrábění, broušení a leštění.

Při výrobě touto technologií je nutné použití podpor, ty jsou však tvořeny nespečeným práškem v okolí výrobku, což lze považovat jako výhodu, jelikož se s podporami nemusí uvažovat při tvorbě 3D CAD programu. Mezi další výhody patří široké spektrum použitelných materiálů, vysoká pevnost a schopnost vytvářet tvarově složité součásti.

K nevýhodám této technologie patří především vysoká energetická náročnost a cena zařízení. Dále pak nižší kvalita povrchu a neschopnost výroby uzavřených dutin (dutina vyplněna nespečeným práškem). [2, 4]

Výzkum a vývoj metody SLS poukazuje na několik důležitých aspektů této technologie. Jeden z nich obsahuje studie vlivu tloušťky nanesené vrstvy na pórovitost povrchu součásti. Ta došla k závěru, že menší tloušťka nanesené vrstvy umožňuje silnější vazbu mezi jednotlivými vrstvami. Důsledkem silnější vazby je potom snížení pórovitosti slinovaného materiálu.

Pro zajištění dané materiálové hustoty a kvality je proto žádoucí určit optimální tloušťku jedné vrstvy. Ta se liší v závislosti na konkrétní aplikaci, materiálu, velikosti zrn a daném výrobním stroji. Pro dosažení největší hustoty částic materiálu je nutno zvolit nanášenou vrstvu co nejmenší, v případě potřeby pórovitého materiálu je tomu naopak. [7]

2.2 Direct Metal Laser Sintering (řízené spékání kovu laserem)

Tato technologie funguje na stejném principu jako je tomu u SLS technologie s tím rozdílem, že technologie DMLS se soustřeďuje a je využívána pouze pro kovové materiály. Je tedy logické, že se mění podmínky spékání. Je používán silnější laserový paprsek a jemnější prášek. Tloušťka jednotlivých nanášených vrstev se pohybuje v rozmezí 20 – 150 μm .

Předností této technologie je především rychlá a zároveň přesná výroba plně funkčních kovových prototypů nebo finálních výrobků, které jsou svými mechanickými vlastnostmi plně srovnatelné s tradičními metodami výroby (obrábění, odlévání). Pro 3D tisk na bázi kovových prášků je technologie DMLS vhodnější, jelikož se soustřeďuje pouze na kovové materiály.

Hlavní výhodou technologie Direct Metal Laser Sintering je stejně jako u technologie SLS schopnost vytvářet součásti složitých tvarů, které nelze běžnými metodami zhotovit. Další výhodou je pak použití kovových materiálů a minimalizace použití podpor. U obou technologií je nespotřebovaný prášek téměř z 98% znovu používán k výrobě, tím se tyto výrobní procesy stávají nejen ekonomickými ale taky ekologickými. Mezi nevýhody DMLS patří opět vysoká energetická náročnost a cena zařízení.

Většina z výzkumů technologie DMLS, obsažena v databázích Scopus a Web of Science, řeší optimalizaci výroby pro konkrétní materiály. Stejně jako u technologie selektivního spékání i zde je důležitá volba pracovních parametrů a tloušťka nanášené vrstvy. Zkoumány jsou též mechanické vlastnosti součástí vyhotovených technologií DMLS a odolnost vůči korozi u jednotlivých materiálů.

Za zmínku stojí studie, zabývající se hodnocením odolnosti proti korozi u výrobků z hliníkových slitin. Ty jsou u této technologie díky své dostačující pevnosti, nízké hmotnosti a především přijatelné ceně práškových materiálu často používanými materiály. Korozní chování hliníkových slitin bylo sledováno za účelem stanovení účinku povrchových úprav. Výsledky této studie ukazují, že odolnost hliníkových slitin vyrobených technologií DMLS závisí především na drsnosti a pórovitosti daného povrchu.

Zvýšení odolnosti vůči korozi se u těchto materiálů dosáhne celkovým zlepšením kvality povrchu. Proto musí následovat povrchové úpravy. Mezi nejčastější a v tomto případě nejúčinnější patří brokování a následné leštění povrchu. [8]

Další technologie jako Selective Laser Melting nebo LaserCUSING jsou obdoby technologií SLS a DMLS, pracující na totožném principu. [2, 5, 6]

3. ZAŘÍZENÍ PRO LASEROVÉ SPÉKÁNÍ KOVU DOSTUPNÉ V ČR

Mezi hlavní výrobce zařízení pro 3D tisk práškovým kovem se řadí hned několik zahraničních firem, které své produkty dodávají buď přímo zákazníkovi, nebo prostřednictvím podniků, prodávajících tento sortiment na území České republiky. Jedná se především o stroje společnosti EOS GmbH, jehož oficiálním tuzemským distributorem je firma 3R Systems s.r.o. Dále pak stroje společnosti Concept laser GmbH, v ČR zastoupené firmou Misan s.r.o., a zařízení vyrobené firmou Renishaw PLC s českou pobočkou Renishaw s.r.o.

Při volbě 3D tiskárny se zohledňují především její technické parametry. Mezi určující parametry patří bezpochyby stavební prostor tiskárny, který omezuje velikost budoucího výrobku. Nejmenší zařízení mají pracovní prostor okolo 50 x 50 x 80 mm (x, y, z), zato u těch největších se rozměry v jednotlivých osách pohybují v hodnotách okolo 500 mm a více.

Dalším důležitým parametrem je výkon laseru. Pro střední stroje se nejčastěji používá laser s výkonem 200 W, pro ty největší a nejmodernější se často používají až dva lasery s výkonem 1000 W. Výkon laseru má dále vliv na produktivitu výroby, která se většinou pohybuje v rozmezí $5 - 20 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. U největšího zařízení může dosahovat až $120 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Kromě laseru má na produktivitu vliv také materiál, tloušťka nanášené vrstvy a geometrie tisku. [9, 10, 11]

V následujícím textu jsou u základních parametrů strojů taktéž orientačně uvedeny základní aplikace výrobků a druhy používaných materiálů. Jejich podrobnějším rozбором se budou zabývat jednotlivé kapitoly.

3.1 Stroje společnosti EOS GmbH

Německá firma EOS GmbH, založena roku 1989, patří k prvním výrobcům zabývajících se technologií Rapid Prototyping. Tato firma uvedla jako první na evropský trh zařízení pro SLA technologii a v roce 1994 se stala prvním světovým poskytovatelem zařízení pro výrobu pomocí laserového spékání. První stroj pracující s technologií Direct Metal Laser Sintering EOSINT M 250 byl uveden na trh v roce 1995. Sloužil především k výrobě nástrojů pro vstřikování plastů. [12]

V současnosti je EOS GmbH světovou jedničkou v oblasti DMLS a na českém trhu jsou nyní k dostání tato zařízení.

EOSINT M 280



Obr. 2: EOSINT M 280 [13]

Základní technické parametry:

Tab. 2: Parametry stroje [13]

Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 325 mm
Výkon laseru	200, 400 W
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 40 μm
\varnothing ohniska svazku	100 - 500 μm

Použití: výroba kvalitních nástrojů z kovu (např. vložky do forem), konečných výrobků a prototypů

Materiály: lehké slitiny, ušlechtilá ocel

Výhody: vysoký stupeň automatizace, široké spektrum použitelných materiálů, výběr optimalizovaného povrchu vyráběné součásti [13]

EOS M 290



Obr. 3: EOS M 290 [14]

Základní technické parametry:

Tab. 3: Parametry stroje [14]

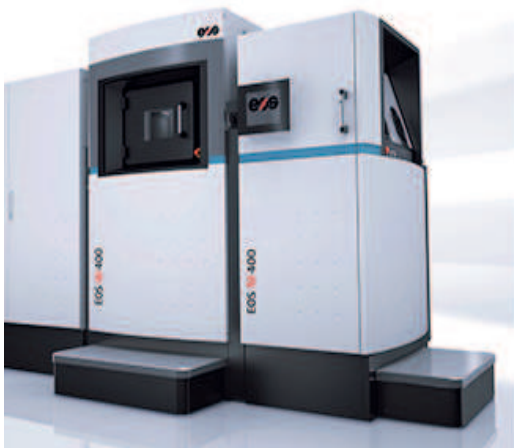
Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 325 mm
Výkon laseru	400 W
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 40 μm
Ø ohniska svazku	100 μm

Použití: sériová výroba kvalitních kovových součástí, náhradních dílů

Materiály: lehké kovy, nástrojové a nerezové oceli, vysoce legované slitiny

Výhody: speciální filtrační systém, ochranná atmosféra – dusík, argon, široké spektrum použitelných materiálů, přídavné moduly pro řízení kvality [14]

EOS M 400



Obr. 4: EOS M 400 [15]

Základní technické parametry:

Tab. 4: Parametry stroje [15]

Stavební prostor	400x400 mm (x, y)
Max. výška	z = 400 mm
Výkon laseru	1 kW
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 90 μm
Ø ohniska svazku	90 μm

Použití: výroba velkých kvalitních součástí z kovu

Materiály: titanové a hliníkové slitiny, nerezové oceli

Výhody: rychlá a snadná obsluha, funkce automatického čištění filtru [15]

3.2 Stroje společnosti Concept Laser GmbH

Tato německá společnost založená roku 2000 se již od svého počátku řadí mezi přední inovátory v oblasti laserového spékání práškovým kovem. Pomocí patentované technologie LaserCUSING otvírá zcela nové možnosti pro efektivní vývoj prototypů a výrobu sériových dílů především v leteckém, automobilovém, lékařském a dentálním průmyslu. Dále při výrobě forem, nástrojů a šperků. [16]

Z uvedených výrobců kovových 3D tiskáren nabízí tato společnost tuzemskému trhu nejširší výběr těchto zařízení. Jedná se o čtyři výkonné výrobní stroje, jejichž hlavním rozdílem je stavební prostor a výkon laseru. Výhodou těchto strojů oproti ostatním výrobcům je především jejich rozmanitost rozměrů stavebního prostoru, kdy jsou tyto stroje nabízené jak v menším provedení, tak v provedení s co největším stavebním prostorem.

Společnost Concept laser GmbH nabízí tato zařízení.

Mlab Cusing/ Mlab Cusing R



Obr. 5: Mlab Cusing/R [17]

Základní technické parametry:

Tab. 5: Parametry stroje [17]

Stavební prostor	90x90 mm (x, y)
Max. výška	z = 80 mm
Výkon laseru	100 W
Tloušťka vrstvy prášku	15 - 50 μm
\varnothing ohniska svazku	40 μm

Použití: pro výrobu součástí, u kterých je kladen důraz na kvalitu povrchu, výroba zubních protetik, kostních náhrad a šperků

Materiály: korozivzdorná ocel, CoCr slitiny, zlato, stříbro, bronz. U typu Mlab Cusing R také reaktivní titanové slitiny

Výhody: vyměnitelné stavební moduly, malé rozměry a hmotnost, bezúdržbový vzduchem chlazený zdroj laserového paprsku [18]

M1 Cusing



Obr. 6: M1 Cusing [17]

Základní technické parametry:

Tab. 6: Parametry stroje [17]

Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 250 mm
Výkon laseru	200, 400W
Tloušťka vrstvy prášku	25 - 80 μm
\varnothing ohniska svazku	50 μm

Použití: prototypy v automobilové výrobě, součásti pro letecký průmysl, výroba forem

Materiály: korozivzdorná ocel, vytvrditelná korozivzdorná ocel, CoCr slitiny, Ni superslitiny

Výhody: přídavné QM moduly pro zvýšení produktivity stavby součásti [18]

M2 cusing/ multilaser



Obr. 7: M2 Cusing/multilaser [17]

Základní technické parametry:

Tab. 7: Parametry stroje [17]

Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 280 mm
Výkon laseru	200, 400 W
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 80 μm
\varnothing ohniska svazku	50 - 500 μm

Použití: automobilový a letecký průmysl, výroba forem a kostních náhrad

Materiály: korozivzdorná ocel, vytvrditelná korozivzdorná ocel, nástrojové oceli, CoCr slitiny, Ni superslitiny, hliníkové a titanové slitiny

Výhody: přídavné QM moduly pro zvýšení produktivity a sledování výkonu laseru [18]

X line 2000R

X line 2000R je jedním z největších strojů na světě. Díky automatické výměně prášku a dvoupaletovému uspořádání pro eliminaci vedlejších časů je vysoce produktivní.



Základní technické parametry:

Tab. 8: Parametry stroje [17]

Stavební prostor	800x400 mm (x, y)
Max. výška	z = 500 mm
Výkon laseru	2 x 1000 W
Tloušťka vrstvy prášku	30 - 150 μm
Ø ohniska svazku	10 - 500 μm

Obr. 8: X line 2000R [17]

Použití: prototypy v automobilové výrobě, součásti pro letecký průmysl

Materiály: titanové a hliníkové slitiny, Ni superslitiny

Výhody: přídatné QM moduly pro zvýšení produktivity stavby součástí, dva stavěcí moduly [18]

3.3 Stroje společnosti Renishaw PLC

Britská společnost Renishaw PLC byla založena roku 1973 a patří mezi světovou špičku v oblasti metrologie, spektroskopie a přesném obrábění. Zabývá se také aditivní výrobou, kde jako jediný britský výrobce nabízí zařízení pro 3D tisk práškovým kovem využívající nově vznikající technologii Laser Melting.

Společnost nabízí komplexní řešení v oblasti kovového 3D tisku. Ve svém portfoliu aditivních technologií proto nabízí krom výrobních 3D strojů vysokých kvalit též potřebné druhy kovových prášků a přídavných zařízení. Výrobní stroje tohoto výrobce jsou určeny pro celou řadu průmyslových aplikací, kde jsou požadavky na výrobu složitých a tvarově specifických součástí požadované přesnosti a vysoké kvality. [19]

V současné době jsou firmou Renishaw PLC na českém trhu k dostání tato zařízení.

AM 250



Obr. 9: AM250 [20]

Základní technické parametry:

Tab. 9: Parametry stroje [21]

Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 300 - 360 mm
Výkon laseru	200, 400 W
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 100 μm
\varnothing ohniska svazku	70 μm

Použití: výroba složitých součástí, kosmický, letecký průmysl, lékařství

Materiály: nerezové a nástrojové oceli, slitiny hliníku, titanu a inconely

Výhody: doplnění materiálu během výroby, malá spotřeba plynu, možnost zvýšení osy z [20, 21]

AM 400



Obr. 10: AM 400 [22]

Základní technické parametry:

Tab. 10: Parametry stroje [22]

Stavební prostor	250x250 mm (x, y)
Max. výška	z = 300 - 360 mm
Výkon laseru	400 W
Tloušťka vrstvy prášku	20 - 100 μm
\varnothing ohniska svazku	70 μm

Použití: výroba tvarově složitých součástí pro automobilový, letecký a kosmický průmysl, výroba implantátů

Materiály: nerezové a nástrojové oceli, slitiny hliníku, kobaltu, titanu a inconely

Výhody: rychlá a flexibilní výměna materiálu, nízká spotřeba argonu, patentovaný filtrační systém [22]

3.4 Příslušenství výrobního zařízení

Kvalitní výrobu dílů nezajišťují pouze samotná zařízení, na kterých proces výroby probíhá. Nezbytné je také příslušenství těchto moderních strojů. Výrobci proto k výrobním strojům doporučují širokou škálu přídatných modulů, které zajišťují plynulý průběh výroby, její kvalitu a především efektivitu. Nejedná se pouze o příslušenství samotné tiskárny ale i zařízení zajišťující další úpravy vyrobené součásti, jako tryskací stroj pro dokonalé očištění povrchu součásti a žhací pec sloužící k následným tepelným úpravám.

Jedním z hlavních přídatných zařízení 3D tiskárny je prosévačka. Úkolem tohoto zařízení je rekuperace prášku, zvyšující efektivnost a ekologičnost výroby. Princip je velmi jednoduchý. Nevyužitý prášek je na tomto zařízení proséván sítí, jehož mřížka dosahuje rozměrů požadované velikosti zrna. Tímto procesem se z použitého materiálu vyloučí částečně slinutý prášek a větší nežádoucí částice. Prášek se tak stane opět použitelným pro další výrobu. Proces může probíhat v inertní atmosféře dusíku nebo argonu. Argon se používá především při manipulaci s práškovými kovy titanových slitin. Tyto plyny deklarují čistotu a kvalitu zpracovaného materiálu. Před samotnou rekuperací je ještě potřeba odsát práškový kov z pracovního prostoru stroje, k tomu slouží speciální vakuový vysavač.

Dalším přídatným zařízením je sušička vzduchu. Ta má za úkol odstranit vlhkost, která má nepříznivý vliv nejen na komponenty celého zařízení, ale především na samotný proces výroby. Pro zajištění dokonalého prostředí výrobního procesu je pracovní komora vyplněna inertním plynem. Ten dodává generátor plynu, který může být přímo součástí stroje nebo jako přídatné zařízení. Jak argon, tak dusík používaný při tomto procesu, jsou plyny, u kterých je třeba dbát předpisů pro zajištění bezpečnosti při jejich používání.

Koncepce jednotlivých výrobců 3D tiskáren je odlišná. Některá z výše uvedených příslušenství jsou přímo součástí výrobního stroje, jiná jsou nabízena odděleně. Přídatné moduly nejsou výhradou výrobce stroje, i když u některých výrobců jsou ke stroji přímo nabízeny. Tryskací zařízení, žhací pec, vysavač, popřípadě sušička vzduchu jsou standardně vyráběná zařízení, která jsou k dostání u specializovaných výrobců, kterých je na trhu nespočet. Takto koupené příslušenství ovšem musí dosahovat potřebných parametrů udávaných výrobcem tiskárny. Nedílnou součástí výrobních zařízení nejsou pouze tato příslušenství, ale také různé softwarové moduly, které kontrolují samotný průběh výroby. Těmito používanými programy se bude zabývat jedna z následujících kapitol. [23]

3.5 Realizace a zabezpečení výrobní laboratoře

V návaznosti na předchozí podkapitolu je velice důležité, aby se při realizaci pracoviště, jehož součástí bude 3D tiskárna a její příslušenství, dodržovalo hned několik bezpečnostních pravidel. Jedním z hlavních důvodů je fakt, že při práci s 3D technologiemi přichází obsluha do styku s reaktivními materiály a nebezpečnými plyny. Únik těchto plynů by pak mohl znamenat přímé ohrožení na životech, v lepším případě devastaci pracovní laboratoře v ceně několika desítek milionů korun.

Hrozbu exploze nepřináší pouze plyny, které se dodávají do procesu výroby cíleně, ale i práškové materiály. Např. při nesprávné manipulaci s práškovým kovem může nastat při výrobě situace, kdy dojde vlivem příliš vysoké teploty tavení k jeho samovznícení, popřípadě výbuchu. Mezní teploty jsou udávány v materiálových listech a je třeba je při použití daného materiálu zohledňovat. Jednotlivé omezení a instrukce k uvedení stroje do provozu udává výrobce daného zařízení a je žádoucí, aby byla tyto pravidla striktně dodržována. Níže uvedená bezpečnostní pravidla a doporučení, která je nutno dodržet při realizaci pracoviště, jsou určena pro zařízení AM 250 společnosti Renishaw PLC. U ostatních výrobců se bude jednat o podobné zásady.

Před uvedením systému do provozu, je nutné provést posouzení rizik dle vnitrostátních právních předpisů. V případě stroje AM 250 výrobce v příručce uvádí nutnost úplného posouzení rizik dle výrobní směrnice ATEX, která zahrnuje zařízení a ochranné systémy určené pro práci v prostředí s nebezpečím exploze. Tímto posouzením dojde k určení vhodných ochranných pomůcek obsluhy a provozních podmínek či postupů pro bezpečné používání výrobního zařízení, zahrnující taktéž podmínky pro skladování a manipulaci použitých práškových materiálů a odpadů výroby. Například pro zajištění bezpečné manipulace a dosažení požadované kvality práškového kovu je žádoucí, aby byl tento materiál skladován na chladném, suchém a dobře větraném místě v hermeticky uzavřených nehořlavých kontejnerech. Práškové materiály nesmí být skladovány v plastových pytlích či neschválených plastových nádobách. Při likvidaci odpadních produktů je zase nutné, aby byly odstraněny bezpečně a šetrně k životnímu prostředí. Autorizaci pro likvidaci odpadů si musí zajistit sám uživatel.[23]

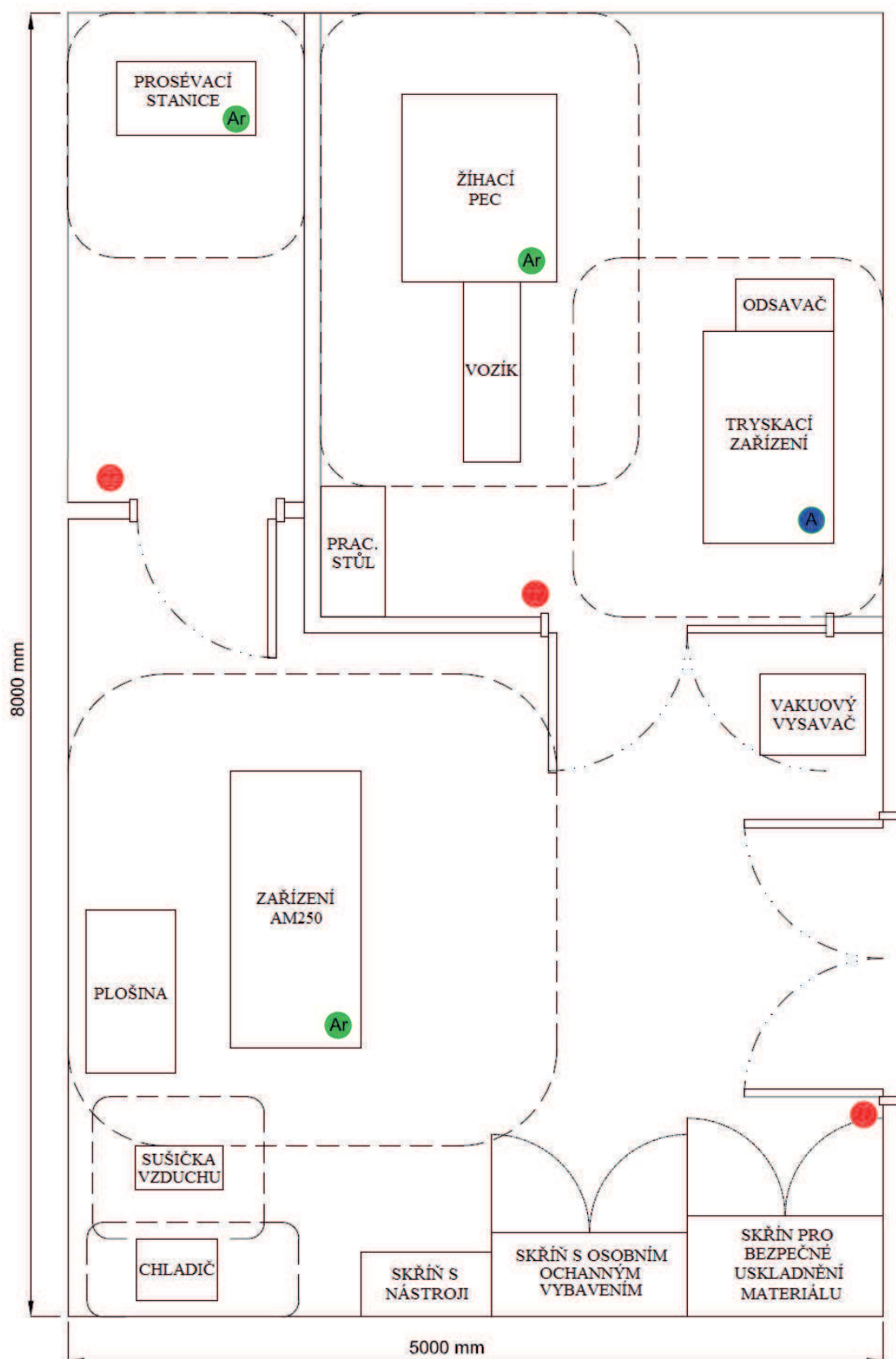
Plyny používané v těchto procesech nepřináší jen riziko exploze. Jelikož je argon těžší než kyslík, šíří se při zemi a vytěsňuje ho pryč. Při vyšší koncentraci tohoto plynu bez zápachu by tak mohlo dojít k udušení obsluhy stroje. Laboratoř by proto měla být často a kvalitně větrána a koncentrace inertního plynu ve vzduchu kontrolována přízemním

monitorovacím zařízením. V případě překročení stanovených limitů musí zařízení hlásit obsluze riziko nebezpečí.

Krom plynu je dále nežádoucí poletavý prach, který může způsobovat podráždění plic. Maximální hodnota množství prachu v laboratoři je $0,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Měla by proto být přijata opatření s cílem minimalizovat kontakt s prášky. Doporučuje se tedy pravidelný úklid, jehož cílem je zajistit, aby se prach v laboratoři nehromadil a taky pravidelný monitoring čistoty ovzduší laboratoře. I přes veškeré bezpečnostní prvky, které jsou na těchto pracovištích a samotných zařízeních instalovány, je nezbytné, aby měla obsluha stroje osobní ochranné pomůcky. Výrobci proto pro manipulaci s práškovými materiály doporučují rukavice, ochranu očí a prachovou masku. Dále pak bavlněnou kombinézu a antistatickou obuv. Zajištění těchto ochranných pomůcek je povinností koncového uživatele. [23]

Z hlediska stavební konstrukce jsou na laboratoř stroje AM 250 kladeny rovněž vysoké nároky. Jelikož se bude jednat o pracoviště vybavené několika stroji větších či menších rozměrů a pracovních prostorů, je pro obsluhu stroje nutné, aby jí byl umožněn co nejpohodlnější pohyb mezi jednotlivými stroji. Pro zajištění dostačujícího přístupu k stroji jsou proto doporučeny minimální odstupy jednotlivých zařízení závislé na velikosti daného stroje. V případě stroje AM 250 jsou doporučené odstupy v rozmezí 1 m okolo zařízení. Ideální rozměry laboratoře stroje AM 250 spolu s veškerým vybavením by pak měly dosahovat minimálních rozměrů 5 x 8 m. Tyto rozměry jsou však pouze orientační, protože mohou být určeny pro každý stroj a zařízení odlišně. Jelikož si příslušenství zákazník volí sám, velikost laboratoře se bude odvíjet dle jeho požadavků. Některé rozměry a požadavky laboratoře jsou přímo dané. Například minimální výška stropu musí činit nejméně 2 700 mm. Podlaha uvnitř laboratoře musí být antistatická. Doporučují se speciální ESD lina či nátěry s daným odporem a minimální šířkou 2 mm. Takto specifické podlahy nejsou žádnou novinkou a na tuzemském trhu jsou nabízeny hned několika výrobci. Dále musí být podlaha ukončena ven z místnosti a jakékoliv spáry, např. mezi podlahou a stěnami, musí být pokryty soklem. Vstupní dveře musí být odolné vůči požáru nejméně po dobu 30 minut a na spodní hraně musí být opatřené kartáčem. Dveře musí být také dobře těsněné, otvírající se do místnosti a opatřené automatickým zavíráním. Veškeré kabely vedoucí elektrický proud musí být dvojitě izolované. Osvětlení laboratoře spolu se všemi zásuvkami a vypínači musí splňovat certifikaci ATEX pro světla a ostatní elektrické prvky určené do výbušného prostředí. Větrací potrubí má být instalované v rohu stropu co nejdále od vstupních dveří laboratoře. [23]

Nákres možného rozmístění strojů a jejich příslušenství v prostorech laboratoře je zobrazeno na obrázku č. 11.



Obr. 11: Schéma pracovní laboratoře [23]

Při pohledu na možné schéma pracovní laboratoře je patrné, že jsou zde stroje elegantně rozmístěné tak, aby byl zajištěn co nejlepší průběh výroby součástí. Každá místnost laboratoře oddělená dveřmi disponuje stroji pro jednotlivé výrobní postupy.

Samotný tisk součástí je realizován v největší místnosti laboratoře, která je kromě výrobního stroje též vybavena sušičkou vzduchu, chladičem, vakuovým vysavačem a jednotlivými skladovacími skříněmi. V případě místa pro skladování materiálu se jedná o speciálně konstruovanou skříň zajišťující bezpečné uskladnění práškových materiálů. Ostatní skříně nejsou nijak specifické, slouží ke skladování ochranných pomůcek a nástrojů pro výrobu.

Další místnost slouží k úpravám součástí po jejich vyhotovení na výrobním stroji. Prostor je tedy vybaven žíhací pecí zajišťující následné tepelné úpravy, jejíž součástí je též zavážecí vozík sloužící k manipulaci s výrobky. Dále je místnost vybavena tryskacím zařízením, které umožňuje dokonalé očištění výrobku od nespečeného prášku a ostatních nečistot. Poslední místnost obsahuje prosévací zařízení, které je umístěno odděleně, především z důvodu zajištění čistoty okolí při procesu prosévání.

Na schématu je každý stroj po svém obvodu obklopen čárkovanou čarou. Ta znázorňuje již zmiňované doporučené odstupy jednotlivých strojů. Zelenými body jsou na schématu označeny stroje, kterým je dodáván argon, v případě modrého bodu se jedná o stlačený vzduch. Červeně jsou označeny hasicí přístroje. Ty musí být umístěny u jednotlivých východů dle požárních předpisů. Pro hašení požáru práškových kovů se doporučuje obklopení plamene pískem či použitím práškového hasicího přístroje. Vzhledem k bezpečnosti se doporučuje použití požárních hlásičů. [23]

Pro zajištění celkové bezpečnosti laboratoře je tedy důležité, aby byla splněna všechna výše uvedená pravidla a doporučení. Kromě opravdu vysokých nároků na konstrukci laboratoře a její bezpečnostní prvky jsou taky důležité znalosti a dovednosti obsluhy stroje. Provoz 3D tiskárny je proto umožněn pouze osobám, které dokončili výcvikový program schválený výrobcem. V případě společnosti Renishaw PLC se jedná o několika denní kurz, ve kterém je uživatel stroje seznámen se softwarem a praktickou obsluhou stroje. V kurzu je budoucí obsluha stroje podrobně seznámena s přípravou počítačového souboru a nastavením parametrů procesu stavění. Z praktických dovedností se obsluha přiučí především správnému použití zařízení, bezpečné manipulaci s prášky a postupy kvalitní údržby stroje. Na vyžádání koncového uživatele je možno absolvovat další odborně vzdělávací kurz. V něm je obsluha stroje dopodrobna seznámena se všemi možnostmi výroby a schopnostmi daného stroje a jeho softwaru. [23]

3.6 Software 3D tiskáren

Nezbytnou součástí 3D tiskáren je jejich software. Jeho hlavním úkolem je příprava dat pro řídicí systém stroje umožňující kvalitní tisk dílů. S tím souvisí hned několik funkcí, které jsou u těchto softwarů požadovány a jsou jejich nezbytnou součástí. Jelikož jde o funkce, které přímo ovlivňují samotný proces výroby, je žádoucí, aby použitý software dosahoval co největších kvalit.

3.6.1 Materialise Magics, nepoužívanější software

Jednoznačné prvenství v oblasti dodávání těchto softwarů drží již několik let společnost Materialise s.r.o. Tato původem belgická firma, založena roku 1990, s pobočkami po celém světě patří mezi celosvětovou špičku v oblasti aditivní výroby. Svým postojem k výrobě prototypů, který se koncentruje především na vývoj technologie výroby, si získala hned několik významných klientů z odvětví automobilového, elektrotechnického či lékařského průmyslu. Své renomé si však společnost nezískala pouze velkými výrobními kapacitami po celé Evropě. Velkou měrou k tomu přispěla také schopnost tvorby kvalitních propracovaných softwarů. [18,24]

Jejich universální, inteligentní software nesoucí název Materialise Magics se stal pro technologie 3D tisku tím nejlepším, co lze v současnosti nabídnout. Tuto skutečnost dokazuje fakt, že software Magics používají všichni již zmínění výrobci 3D strojů u všech svých výrobních zařízení, které jsou k dostání na evropském i celosvětovém trhu.

Jednou z mnoha funkcí tohoto softwaru je importace 3D modelu součásti do formátu STL (standardní triangulační jazyk). Jedná se o to, že 3D model součásti vytvořený např. v klasickém CAD systému je převeden do formátu, který dokáže zpracovat řídicí procesor daného stroje. Při převedení dat do formátu STL je 3D model součásti nahrazen vysokým počtem rovinných trojúhelníkových ploch, které představují povrch objektu. Zároveň software opraví případné chyby povrchu vyráběného dílu vzniklých převodem do jiného formátu. Jak je z následujícího obrázku patrné, Magics lze zjednodušeně charakterizovat jako program umožňující vazbu CAD modelu součástí přímo s výrobním strojem. [24, 25]



Obr. 12: Schéma využití softwaru [25]

Mezi další funkce patří např. rozšíření geometrie vyráběného dílu o přídatky sloužící k následným dokončovacím výrobním procesům. Dojde tak stejně jako u následujících funkcí softwaru k urychlení celkového času návrhu modelu součásti a zvýšení efektivity celého procesu výroby. Software dále umí automaticky přidělit součásti její výrobní číslo či aplikovat složité jak povrchové, tak i objemové struktury. Při nutnosti použití podpor z důvodu snížení rizika zborcení vyráběného kusu, umí software buď manuálně, nebo automaticky vytvořit podpěry přepisů součásti. I když jsou u dílů vyrobených metodami SLS a DMLS podpory tvořeny nespečeným práškem okolo vyráběné součástky, ne vždy jsou dostačující. Použití konstrukčních podpor je proto velmi časté především u tvarově složitějších součástí. Výrobní stroje od softwaru taktéž vyžadují rozdělení 3D modelu do jednotlivých výrobních vrstev. Šířky jednotlivých vrstev pokládaného prášku volí software v závislosti na použitém výrobním stroji, materiálu a zadaných parametrech procesu stavění dané součásti. [25]

Tento základní software obsahuje několik důležitých a inteligentních modulů, které usnadňují nastavení výrobních parametrů, popřípadě zlepšují kvalitu softwarových možností. Krom tzv. Import modulu sloužícího k již zmíněnému importu 3D modelu do cílených formátů a automatické opravě souborů je možné využití dalších užitečných modulů.

Jedním z výhodných modulů je např. modul struktury součásti. Ten byl navržen za účelem snížení spotřeby kovového prášku a hmotnosti vyráběného dílu, při zachování pevnosti celé konstrukce. Tento užitečný modul tak dokáže přeměnit plný model výrobku na dutý, popřípadě vytvořit speciální vnitřní mřížkovou konstrukci zobrazenou na obrázku níže. [26]



Obr. 13: Příklad mřížkové konstrukce [26]

Užitečnost mřížkové konstrukce a tudíž i celého modulu je dobře vidět na příkladu jablka. V případě duté konstrukce by součást nemusela splňovat podmínky pevnosti a výrobce by byl nucen vyrobit součást plnou. To by znamenalo mnohonásobně vyšší

spotřebu materiálu, která by se projevila na celkové ceně součásti. Ovšem za použití mřížkové konstrukce by vyrobený díl dosahoval přijatelné pevnosti. Zároveň by došlo k požadované úspoře materiálu a ke snížení celkové hmotnosti produktu. Při konstruování dutých popřípadě mřížkových konstrukcí nesmí konstruktér zapomenout na otvor pro vyjmutí nespečeného prášku z vytvořené dutiny. Zde opět pomůže tento modul, který otvory pro odstranění prášku sám navrhne. [26]

Při výrobě součástí na 3D strojích je třeba brát, v rámci snížení výrobních časů a nákladů na výrobu, v potaz též rozložení výrobků na stavěcí platformě. Zde je nutno připomenout, že při samotném tisku součásti je zbytek komory vyplněn práškem, který se po vyhotovení dílu musí pro své znovu použití prosévat. Logicky je tedy vhodnější zaplnit výrobní komoru co největším počtem vyráběných dílů. Tak bude spotřeba prášku jednotná a k prosetí půjde co nejméně použitého materiálu. Dojte tak k úspoře materiálu a především k požadovanému zvýšení rychlosti stavby a produktivity. Rozložení jednotlivých dílů a jejich monitoring má na starost speciální Sinter (slinovací) modul, který automaticky vyplní komoru co nejvíce díly jakýchkoliv rozměrů a tvarů. Modul je taktéž vybaven speciální funkcí Sinterbox, která chrání malé křehké části a zajistí jejich následnou lokaci po vybudování celé výrobní sorty. Příklad rozvržení dílů je uveden na následujícím schématu. [27]



Obr. 14: Příklad rozvržení součástek [27]

Krom dalších užitečných modulů, které např. optimalizují konstrukci podpěr v závislosti na teplotních deformacích apod., lze software obohatit balíčkem Autofab. Ten jej doplňuje o několik dalších užitečných funkcí pro zefektivnění celkové výroby.

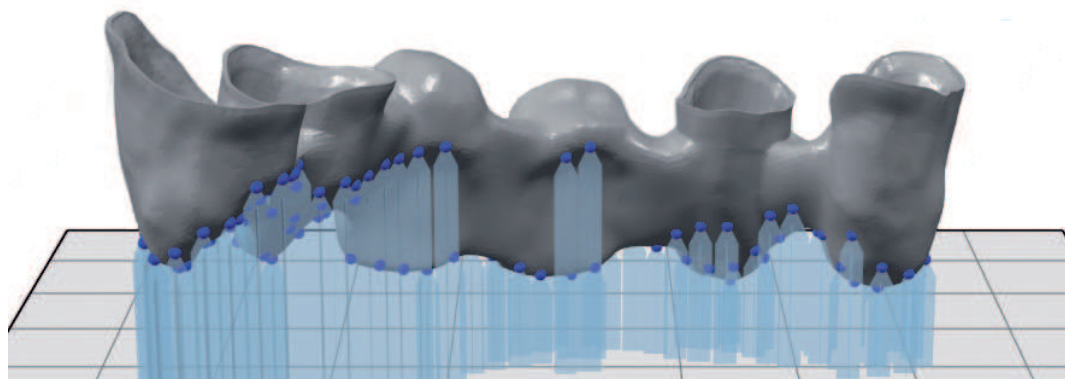
V souvislosti s 20. výročím existence tohoto softwaru začal výrobce nabízet jeho nejnovější verzi. Nová verze, nesoucí název Materialise Magics 20, s sebou nese řadu inovací, které stávající software vylepšují. Software je vybaven modernějším intuitivním

rozhraním a jeho funkce pracují jednodušeji a rychleji. Pečlivě se taky zaměřuje na kontrolu kvality výroby. S tím souvisí komplikované měření a jeho výsledné zprávy. Aktualizace se dočkaly i již zmíněné přídatné moduly. Např. Sinter modul nové verze softwaru umožňuje rozmístění součástí v prostoru komory o téměř 40% rychleji než tomu bylo doposud. Dále umí automaticky zastavit ukládání součástí do výrobní komory po předem definovaném intervalu hustoty dílů či jejich výšky apod. [28]

Vazbu mezi softwarem Materialise Magics a samotnou výrobou zajišťuje stavěcí procesor stroje, který výrazně zjednodušuje proces výroby daného zařízení. Je proto žádoucí zajištění plynulé a co nejkvalitnější spolupráce softwaru s daným procesorem. Nutností je tedy úzká spolupráce výrobců stroje a procesoru s výrobcem daného softwaru. Především z tohoto důvodu jsou dané procesory jednotlivých strojů společností EOS GmbH a Renishaw PLC vyvíjeny také firmou Materialise s.r.o. Výsledkem je dokonalá sladěnost a pohodlné rozhraní člověk-stroj. Vlivem bezproblémové integrace se softwarem Magics je uživateli stroje umožněno využívat všech výhod a specifíků daného Softwaru na špičkové úrovni.

3.6.2 3Shape CAMbridge software

Krom výroby specifických dílů a prototypů pro automobilový, kosmický a letecký průmysl, kde software společnosti materialise takřka nemá konkurenci, je technologie 3D tisku využívána též průmyslem lékařským. Zde je pro své přímé zaměření na toto odvětví, nejčastěji používán software dánské společnosti 3Shape A/S.



Obr. 15: Návrh zubní náhrady[18]

Software s názvem 3Shape CAMbridge se zaměřuje na přípravu dat pro lékařské odvětví, zejména pak na výrobu zubních náhrad. Stejně jako software společnosti Materialise podporuje také tento software optimální uspořádání součástí na stavěcí platformě a jejich rozložení v rámci celé pracovní komory. Pomocí aplikace dostavěných platform umožňuje software kladení součástí do více vrstev. Mezi další funkce opět patří optimalizované vytváření podpěr převisů, identifikační značení vyráběných dílů či automatické shromažďování součástí podle daných zakázek. Ve spojení s 3D skenery, které 3Shape A/S rovněž vyvíjí a produkuje, je při výrobě zubních protetik dosaženo vysoké přesnosti rozměrů a požadovaných tvarů. Což je při aplikaci zubních náhrad bezpodmínečnou nutností. [18, 29]

Z předchozího textu o obou softwarech lze konstatovat, že kvalitní software je mozkiem celého výrobního zařízení. Nebýt těchto softwarů majících schopnost zpracovat 3D data v tak vysoké kvalitě a využít je tam, kde je požadováno, byly by všechny výrobní stroje prakticky k ničemu.

4. VYUŽITELNÉ PRÁŠKOVÉ KOVY PRO ADITIVNÍ VÝROBU

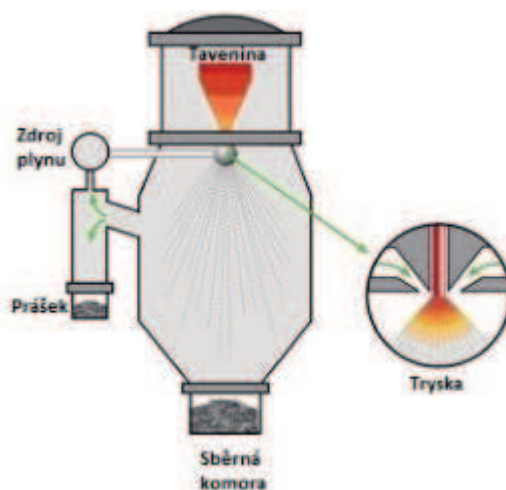
4.1 Výroba práškového kovu

Nejběžnější způsob výroby kovového prášku je rozstřikování taveniny, tzv. atomizace. Princip této technologie spočívá v působení tlakem rozprášené kapaliny, plynu nebo odstředivých sil na proud roztaveného kovu. Vlivem rozprášení dojde k vytvoření miniaturních kapek, které díky ochlazenému rozprašovacímu médiu rychle tuhnou. Dochází tedy ke vzniku jemných kovových částic.

Velikost těchto částic neboli jemnost prášku závisí na teplotě taveniny a velikosti energie působícího média. Za vyšší teploty a velikosti působících sil dosáhneme vyššího podílu jemnozrnného prášku.

Běžný a ekonomicky výhodný způsob výroby kovových prášků je atomizace vodou. Zejména díky nízké ceně média (vody) a vysoké produktivitě výroby. Při této metodě však dochází ke vzniku nepravidelných částic prášku, které jsou nevhodné pro použití v oblasti aditivní výroby, kde je potřeba stejných a tvarově pravidelných sférických částic. Za určitých podmínek je sice možné vyrobit použitelný kovový prášek, nicméně se jeví jako výhodnější výroba prášků pomocí rozprášeného plynu.[30, 31]

Při atomizaci plynem může být tavenina rozprášena z trysky vycházejícím vzduchem, argonem, dusíkem nebo héliem. Princip výroby touto metodou je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 16: Princip atomizace plynem [30]

Rozprašování plynem se používá pro prášky vyrobené z Fe a Co slitin, superslitin niklu i jiných vysoce legovaných materiálů. Hlavní výhodou této metody je krom širokého

spektra druhů použitých materiálů taky homogenita výroby prášků a jeho dobré vlastnosti zapříčiněné sférickým (kulovým) tvarem částic.

Částice používaných prášků by měly mít kulovitý tvar také z důvodu rovnoměrného slinování částic a zajištění co největší hustoty pokládané vrstvy. Velikost jednotlivých částic se pohybuje v rozmezí 50 – 150 μm v závislosti na typu použitého stroje. [30, 31]

4.2 Používané práškové kovy a jejich tepelné zpracování

Mezi nejčastěji používané kovy v procesech aditivní výroby patří především nerezové oceli, slitiny hliníku, titanu, martenzitické či korozivzdorné nástrojové oceli, bronz a superslitiny niklu. Dále pak speciální CoCr slitiny používané v lékařství pro výrobu zubních náhrad.

Materiály nabízené společnostmi EOS GmbH, Concept Laser GmbH a Renishaw PLC jsou téměř stejné. Nicméně aby výroba součástí dosahovala co nejlepších výsledků z hlediska kvality a efektivity procesu, prochází tyto práškové materiály určitou optimalizací. Jedná se o to, že každý výrobce upravuje vlastnosti kovového prášku tak, aby byly co nejvhodnější pro dané parametry stroje a technologii spékání. Ke každému výrobnímu zařízení jsou tedy v katalogích výrobců uváděny použitelné materiály, u kterých výrobce garantuje kompatibilitu s daným strojem.

V tabulce níže můžete vidět přehled nejčastěji používaných práškových materiálů pro výrobu součástí pomocí 3D tisku.

Tab. 11: Druhy používaných materiálů

Druhy materiálů	Označení
Korozivzdorné oceli	1.4404, 1.4542
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg, AlSi12
Niklové superslitiny	Inconel 625, Inconel 718
Titanové slitiny	Ti6Al4V ELI, Ti6Al4V, Ti6Al7Nb
Komerčně čistý titan	ASTM F67
Martenzitická nástrojová ocel	1.2709
Bronz	CuSn10

U každého dále uvedeného práškového materiálu je krom základních materiálových vlastností orientačně uvedeno následné tepelné zpracování. Důvodem aplikace tepelného zpracování je dosažení co nejlepších vlastností konečného produktu, snížení vnitřního

pnutí a zabránění tak možným deformacím součástí a materiálovým vadám. Jedná se o doporučené tepelné úpravy vyrobených součástí, praktikované společností Concept laser GmbH.

Z klasicky používaných korozivzdorných ocelí se jedná především o materiál 1.4404. Tento materiál se vyznačuje vynikající odolností proti korozi, kyselinám a vysokou tažností. U součástí z tohoto materiálu, které jsou náchylné na deformace, se po samotném vyhotovení doporučuje ohřev na teplotu 500 °C, výdrž na této teplotě po dobu 6 hodin a následné vychladnutí. Dalším zástupcem těchto ocelí je precipitačně vytvrditelná korozivzdorná ocel 1.4542. Předností tohoto materiálu jsou dobrá odolnost vůči korozi, houževnatost a především jeho dobré mechanické vlastnosti. K cílenému vytvrzení je třeba výrobek prudce ochladit z teploty okolo 1050°C vodou, olejem nebo vzduchem, následně ohřát na teplotu 480°C a po 1 hodinové výdrži na této teplotě nechat vychladnout. [18,32]

Další skupinu často používaných práškových materiálů tvoří slitiny hliníku. Jedná se o slitinu AlSi12 a AlSi10Mg. Prášky z těchto materiálů jsou vhodné pro prototypovou a malosériovou výrobu. Předností jsou dobré tepelné vlastnosti, pevnost a tvrdost. Pro docílení dobrých vlastností se doporučuje vyrobenou součást během 1 hodiny ohřát na teplotu 240 °C. Po 6 hodinové výdrži na této teplotě by mělo následovat vychladnutí za pokojových podmínek. [18, 32]

Velmi často používaným materiálem je titan. V práškové podobě se vyskytuje buď jako komerčně čistý titan, nebo častěji používané slitiny titanu Ti6Al4V ELI, Ti6Al4V a Ti6Al7Nb. Vyhledávaným materiálem je hlavně pro svou biokompatibilitu, nízkou hmotnost a pevnost. Předností těchto slitin bývá také vynikající odolnost vůči korozi a právě díky těmto vlastnostem je titan a jeho slitiny nejvhodnějším materiálem pro výrobu součástí nejen lékařského průmyslu. Doporučené tepelné úpravy čistého titanu a jeho slitin se výrazně neliší. Jedná se o 4 hodinový ohřev v ochranné atmosféře argonu na teplotu 820°C, následná výdrž na této teplotě a ochlazení na teplotu 500 °C. [18, 32]

Dalším používaným materiálem je nástrojová martenzitická ocel 1.2709, která se vyznačuje vynikající pevností v kombinaci s vysokou houževnatostí a dobrou tepelnou vodivostí. Tato ocel slouží k výrobě hotových součástí. Po výrobě následuje ohřev na teplotu 540 °C rychlostí 100°C za hodinu, přičemž se tato teplota udržuje po dobu 6-10 hodin, poté následuje vychladnutí v peci. [18]

K výrobě dílů, u kterých je požadována odolnost vůči vysokým teplotám, nachází nejčastější využití superslitiny niklu. Jedná se o tzv. Inconel 625 a 718. Charakteristickým

znakem obou materiálů je dobrá odolnost vůči korozi a vysoká pevnost v tahu. U Inconelu 718 je tepelné zpracování prováděno v argonu. V prvním kroku je aplikováno rozpouštěcí žhání při 980 °C po dobu 1 hodiny s následným vychladnutím v peci. Poté následuje 8 hodinové vystárnutí při teplotě 720 °C, ochlazení na teplotu 620 °C a 8 hodinová výdrž na této teplotě. U Inconelu 625 se jedná o ohřev na teplotu 875 °C s výdrží 30 minut, taktéž v ochranné atmosféře argonu. [18,32]

4.3 Trh s práškovými kovy

S rostoucí poptávkou, popularitou, stálým vývojem a modernizací aditivní výroby pomocí práškového kovu je patrné, že krom trhu se samotnými zařízeními pro výrobu bude hrát v této oblasti důležitou roli také trh s používanými práškovými materiály. Přední výrobci zařízení pro 3D tisk práškovým kovem proto dodávají zákazníkům nejen své stroje, nýbrž také jednotlivé práškové kovy.

Lze předpokládat, že samotné kovové prášky jsou vyráběny a vyvíjeny v úzké spolupráci s výrobcem stroje jinými podniky, které se přímo specializují na vývoj a výrobu práškových materiálů. Ty pak kov ve formě prášku dodávají výrobcům stroje, kteří ho nabízejí jako materiál doporučený samotným výrobcem, který je optimalizovaný pro danou technologii výroby. Je jasné, že takto dodávaný produkt je dražší než kdyby byl k dostání přímo od výrobce prášku.

Znamé společnosti, které vyrábí prášky pro již tradiční práškové procesy, si uvědomují, jaký potenciál má 3D tisk jak v současnosti, tak do budoucna, a začali taktéž s vývojem a produkcí kovových prášků specializovaných pro účely aditivní výroby. Na trhu jsou tak k dostání kovové prášky společností jako jsou např. ERASTEEL, Metalysis, Sandvik a mnoho dalších. [31]

Při použití kvalitních titanových slitin dosahuje cena prášku o hmotnosti 100 kg téměř 1 700 000 Kč. Tyto materiály ovšem patří mezi ty nejdražší práškové kovy. Při použití klasických nerezových ocelí a hliníkových slitin uvedených výše dosahuje cena prášku stejné hmotnosti zhruba 300 000 Kč. Ceny práškových kovů použitelných pro výrobu součástí pomocí 3D tisku, jsou v současnosti značně vysoké. Lze však očekávat, že ceny materiálu budou v příštích letech s rozvojem těchto technologií klesat.

V budoucnu bude bezesporu zajímavé sledovat, jak se bude trh s práškovými materiály vyvíjet. Už jen fakt, že tyto materiály spolu se všemi technologiemi 3D tisku budou procházet neustálým vývojem, optimalizací a zdokonalováním, naznačuje, že v sobě tato oblast trhu skrývá obrovský potenciál.

5. APLIKACE VÝROBY ADITIVNÍMI TECHNOLOGIEMI

Pro vyhotovení konstrukčně složitých součástí se obvykle volí konvenční technologie výroby jako tváření, popřípadě slévání. Pro zajištění kvality a tvaru požadovaného dílu je u většiny případů nutno takhle vyhotovenou součást dále obrábět. To v praxi znamená více nákladů na výrobu součásti a delší výrobní časy, z čehož plyne nízká produktivita celého výrobního procesu. Tyto technologie však lze účinně nahradit nekonvenční technologií kovového 3D tisku. [33]

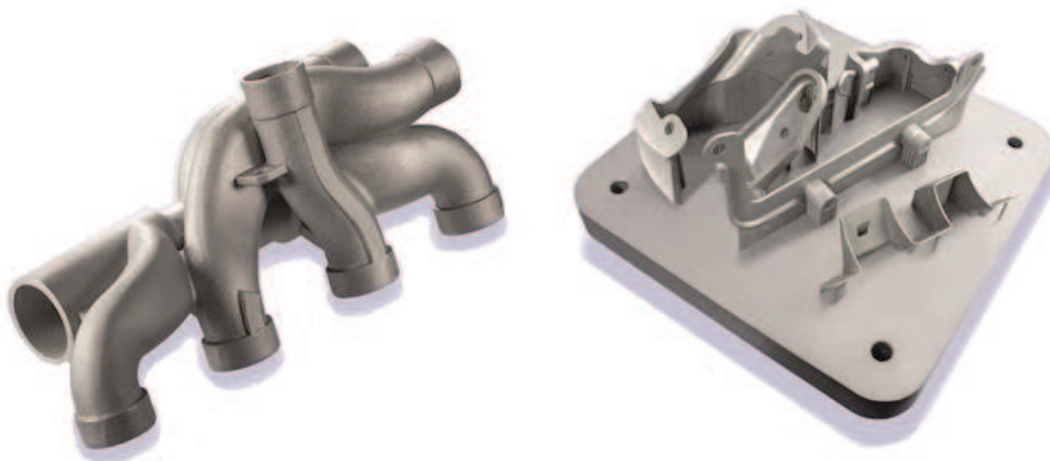
Výhody této technologie bývaly donedávna přednostně využívány především při výrobě prototypů zajišťující kontrolu navržené součásti. Ty je možné rozdělit dle účelu, pro který byly vyhotoveny na prototypy konstrukční, vzhledové (design), funkční a technické. U konstrukčních prototypů se ověřuje správnost geometrie součásti a její případné montáže. Prototypy designu zase slouží k lepší představě celkového vzhledu a velikosti vyráběného dílu. U obou zmíněných druhů prototypů nejsou podstatné materiály, z kterých jsou prototypy vyhotoveny.

Jinak je tomu u prototypů funkčních. Ty dovolují všestranné testování či analýzy daného prototypu a je tedy nutností, aby byl pro výrobu prototypu použit materiál shodný či podobný s materiálem navrhovaného výrobku. Dosáhne se tak při testování prototypu hodnot, které platí jak pro prototyp, tak pro konečný výrobek. Výhoda výroby prototypů technologií kovového 3D tisku spočívá krom úspory času a financí též v absenci tvorby speciálních nástrojů pro jeho výrobu.

V současnosti už nejsou technologie kovového 3D tisku výhradou prototypů. Čím dál více se 3D tisk, snižující čas a potřebné výrobní náklady, používá pro běžnou výrobu součástí. Nejčastěji pro výrobu těch konstrukčně složitých, které prakticky nelze konvenčními technologiemi vyrobit. Není tedy divu, že největší využití těchto technologií připadá automobilovému a leteckému průmyslu. Tedy největším tahounům strojírenského odvětví, kde je výroba tvarově složitých dílů častá a nároky na efektivní výrobu poměrně vysoké. Dalším významným odvětvím, kde tyto technologie dosáhli velké obliby a nenahraditelnosti, je zdravotnictví. Zde tyto technologie dosahují největšího významu především při výrobě kostních náhrad z kvalitních materiálů a zubních protetik.

5.1 Využití kovového 3D tisku v automobilovém a leteckém průmyslu

Největší využití kovového 3D tisku v oblasti automobilového průmyslu v současnosti spočívá především ve výrobě prototypů odlitků a plechových dílů. V případě výroby prototypů klasickými konvenčními technologiemi je totiž pro zhotovení odlitku nutné vyrobit formu a model prototypu. Použitím technologií 3D tisku tak dojde k výrobě prototypu bez jakýchkoliv speciálních nástrojů a operací rychleji a levněji. To platí i v případě výroby plechových dílů, kde odpadá nákladná výroba tvářecích nástrojů. [34]



Obr. 17: Příklad prototypů odlitku a plechového dílu [34]

Funkční součásti vyrobené kovovým 3D tiskem nacházejí své uplatnění v motorsportu. Zde se tyto technologie používají pro výrobu zakázkových dílů. Jedná se například o chladicí potrubí motoru, součásti čerpadel a výfukových systémů nebo speciální konstrukční díly. Hlavním cílem v této oblasti je redukce váhy a účinnosti paliva za účelem zvýšení rychlosti závodních vozidel. K redukci váhy může být s výhodou použita mřížková konstrukce, která je uvedena v kapitole zabývající se softwary a řídicími procesory výrobních 3D strojů, viz str. 18. Tu lze použít např. pro odlehčení rámu při zachování dostačující pevnosti celé konstrukce. [34, 18]

Chladicí potrubí či celé chladicí systémy vyrobené technologií kovového 3D tisku dosahují významné kvality především díky tvarovým možnostem, které technologie spékání dovolují. Schopnost jednoduché výroby dílů s komplexní vnitřní geometrií spolu s rychlým vývojem prototypů, který tyto technologie zajišťují, nabízí kvalitní zázemí pro výrobu těchto dílů.

Velký rozmach a příslib do budoucna zažívá 3D tisk kovu v oblasti leteckého průmyslu. Zde je stejně jako u toho automobilového používán pro výrobu tvarově

optimalizovaných odlehčených součástí. To vede k snížení celkové hmotnosti stroje a spotřeby paliva. Letadlo pak může dosahovat vyšší rychlosti a delšího doletu za snížené spotřeby pohonné hmoty. [18]

Analýzu a optimalizaci součástí lze provést od konstrukčních prvků letadla až po jednotlivé díly turbín a motorů. Díly, které byly dříve vyráběny klasickými konvenčními metodami, mnohdy velmi pracně, lze nyní vyrábět jednoduše. Navíc mohou být součásti vytvořeny jako duté, popřípadě vyplněné mřížkovou konstrukcí. Ve finále tak může dojít ke snížení hmotnosti celého letadla v řádech stovek kilogramů.

Konkrétním příkladem nespočetných výhod 3D tisku je výroba palivových trysek letadel vyráběných firmou GE Aviation. V případě klasické výroby je palivová tryska složena s téměř 20 samostatných součástí. Ovšem za použití kovového 3D tisku je tryska jeden samostatný kus. Už jen to je výhodou, neboť standardní motor daného letadla obsahuje těchto palivových trysek hned devatenáct. Aplikací této výroby se dosáhne snížení hmotnosti palivové trysky o téměř 25 %. Takto vyrobené trysky jsou navíc oproti původním pětkrát odolnější a efektivnější. [35]



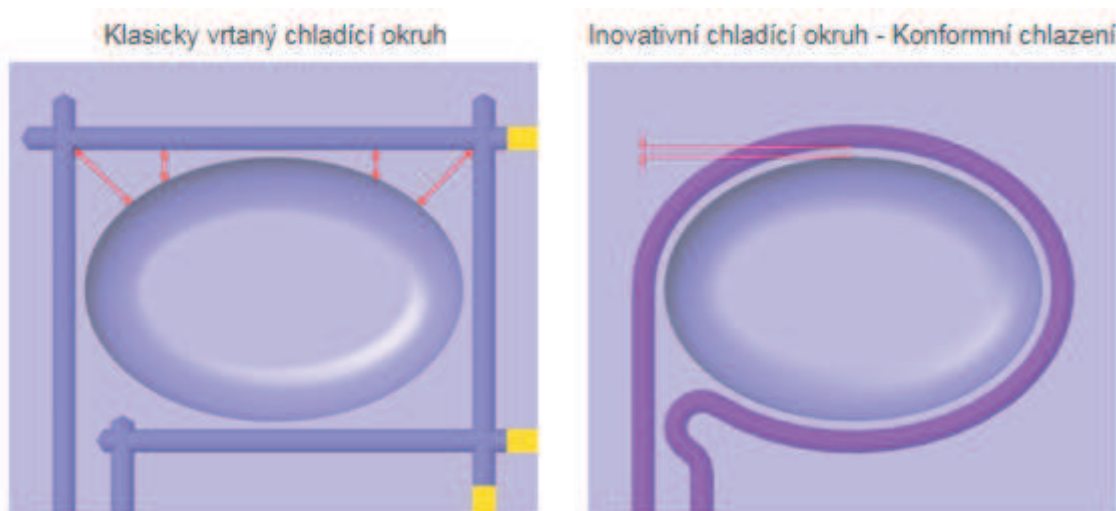
Obr. 28: Palivová tryska zhotovená 3D tiskem [37]

Společnost GE Aviation, jakožto celosvětový poskytovatel proudových motorů a jejich komponentů, proto otevřela centrum pro aditivní technologie v Pittsburghu. Zde plánuje ročně vyrobit až 30 000 těchto palivových trysek, které chce nadále vyvíjet a nabízet jejich nové generace. [35, 36]

5.2 Další využití kovového 3D tisku v praxi

Jedním z mnoha strojírenských odvětví, kde lze s výhodou použít technologii DMLS, je oblast výroby vstřikovacích forem. Příkladem je tomu společnost Innomia a.s. zabývající se kvalitní výrobou plastových a kovových prototypů technologií Rapid Prototyping. Ta jako první z tuzemských firem začala využívat technologie laserového natavování k výrobě konformního chlazení forem.

Konformní chlazení lze charakterizovat jako okruh chlazení formy, který dokonale kopíruje povrchový tvar výlisku. Rozdíl klasicky vrtaného chladicího okruhu a toho konformního lze vidět na následujícím obrázku.

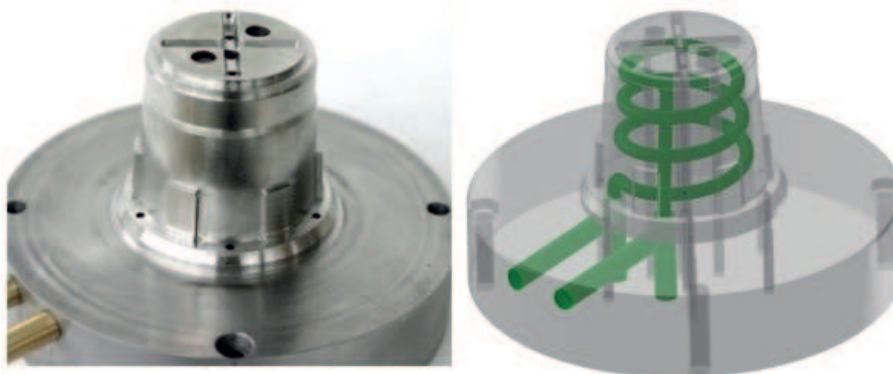


Obr. 39: Schéma chladících okruhů [38]

Hlavním přínosem tohoto konformního chladicího okruhu je výrazné snížení celého cyklu chlazení a to téměř o polovinu. Navíc má takto vyrobené konformní chlazení vliv na deformaci výlisku, kterou v co největší míře snižuje. Mezi další výhody patří rovnoměrný odvod tepla z dutiny formy a možnost optimalizace chlazení dle výlisku bez závislosti na výrobních možnostech.

Krom samotné výroby tohoto chlazení využívá firma Innomia a.s. stroj EOSINT M 280 k opravám forem či jejich vložek. Technologie DMLS totiž rozšiřuje dosavadní možnosti oprav. V praxi to znamená, že formy, které byly doposud neopravitelné, lze v současnosti pomocí 3D tisku kovu opravit, popřípadě modifikovat. Firma navíc disponuje optickým 3D skenerem. Ten v případě oprav formu naskenuje a pomocí softwaru získá potřebná CAD data umožňující kvalitnější opravu formy. [38]

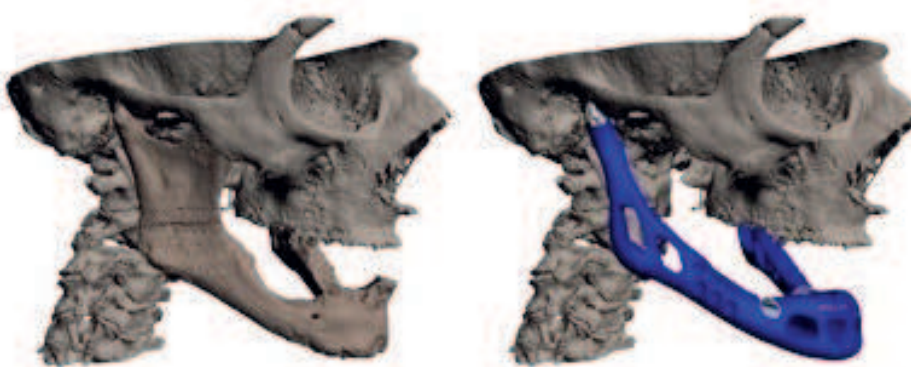
Konkrétní příklad konformního chlazení lze vidět na obrázku č. 20. Minimální průměr chladicího kanálku, garantovaný výrobcem, činí 3 mm. Na požadavek zákazníka je však výrobce schopen vyrobit chladicí kanálek menšího průměru, ovšem bez zaručení cílené kvality. [40]



Obr. 20: Příklad konformního chlazení [38]

Krom aplikací ve strojírenském průmyslu nabízí technologie kovového 3D tisku zcela nové možnosti i v lékařství. Zde tato technologie umožňuje specifickou výrobu implantátů s širokou rozmanitostí tvarových ploch. Možnost výroby vhodnějších objemových prvků zaručuje dokonalé vyztužení kosti implantátem. Výhodou této výroby je taktéž schopnost vytvoření makroporézní povrchové struktury, která umožňuje optimálnější prorůstání kosti do aplikovaného implantátu. Rozhodujícím prvkem je možnost vytvoření velmi přesného implantátu díky vytvoření CAD dat z naskenovaného místa jeho budoucí aplikace.

Mezi nejčastěji používané materiály se řadí čistý titan a jeho slitiny, korozivzdorné oceli a kobalt-chromové slitiny. Příklad použití těchto implantátů je uveden na následujícím obrázku. [18]



Obr. 21: Náhrada spodní čelisti [39]

Dále nelze opomenout význam 3D tisku v dentálním průmyslu. Zde je tato výroba daleko ekonomičtější, než tomu bylo doposud. Předností je rychlá výroba zubních komponent spojená s vysokou kvalitou a přesností. Opět zde hraje velkou roli skenování úst a následné vytvoření virtuálního modelu. Dosáhne se tak těch nejlepších vstupních hodnot pro výrobu dokonale pasujících korunek, můstků a dalších ortodontických aparátů. [18]

Existuje mnoho dalších odvětví a konkrétních produktů, kde aplikace výroby pomocí technologií 3D tisku nabízí značné výhody. Nelze však uvést všechny konkrétní případy. Výroba kovových součástí technologiemi DMLS a SLS se v současnosti na tuzemském trhu objevuje jen zřídka. Daleko známější a zaběhnutější je na trzích v USA, kde popularita těchto technologií nadále roste. Do budoucna lze předpokládat, že se tyto technologie stanou nedílnou součástí klasické výroby i na území ČR, potažmo celé Evropy.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byla rešerše na téma aditivní technologie výroby, kde mělo dojít k shromáždění informací o dostupných technologiích 3D tisku kovu, použitelných práškových materiálech a konkrétních aplikacích aditivní výroby.

V úvodním textu práce byla provedena stručná analýza nejpoužívanějších technologií kovového 3D tisku. U každé z používaných metod byl uveden její princip a charakteristika, obsahující výhody a přednosti daných technologií. Dále následovalo seznámení s předními výrobci 3D strojů a podrobná analýza těchto výrobních zařízení, dostupných na území ČR.

S výrobními stroji úzce souvisí jejich příslušenství a stroje umožňující plynulou výrobu. Další část této práce se proto zabývala potřebným příslušenstvím, které musí splňovat určitá specifika. Součástí této kapitoly byl taktéž návrh pracovní laboratoře, kde byly shrnuty veškeré podmínky a důležité zásady pro aplikaci aditivní výroby.

Dále následoval podrobný rozbor nejpoužívanějších softwarů, kde byly uvedeny jejich základní funkce, užitečné vlastnosti a jednotlivé přídatné moduly, které optimalizují výrobu a zajišťují její efektivitu.

Další z kapitol zahrnovala veškeré práškové materiály použitelné v tomto odvětví. Krom postupu samotné výroby prášku byl v práci také obsažen podrobný seznam používaných kovů a jejich slitin. Ten byl navíc doplněn o doporučené tepelné úpravy jednotlivých materiálů.

V samotném závěru byla práce doplněna o konkrétní aplikace v různých průmyslových odvětvích.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval paní doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D. za její ochotu a odborné vedení mé bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich : Hanser, c2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [2] Rapid Prototyping. *Ústav stroj. Tech. VUT* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_tehnologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf.
- [3] Selective Laser Sintering. *Rapid Prototyping service Canada*. [online]. 2012 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://rapidprototypingservicescanada.com/selective-laser-sintering-sls.php>.
- [4] Selective Laser Sintering. *3D – tisk*. [online]. © 2014- [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>.
- [5] Direct Metal Laser Sintering. *DMLS*. [online]. © 2007- [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>.
- [6] ROZKOŠNÝ, Luboš. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. *Konstruktor* [online]. Březen 2015 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>.
- [7] SHIRAZI, SFS, S GHAREHKHANI, M MEHRALI, H YARMAND. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing: *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS*. 2015, 16(3). DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/033502. ISSN 14686996.
- [8] CABRINI, M, S LORENZI, T PASTORE, S PELLEGRINI, D MANFREDI. Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering. *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*. 2016, 231, 326-335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.12.033. ISSN 09240136.
- [9] 3D Tisk – kov. *3R Systems*. [online]. © 2014- [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/3d-tisk/3d-tisk-kov>.

- [10] Concept Laser. *Misan Obráběcí stroje a nástroje*. [online]. © 2002-2016 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/concept-laser/obsah-kategorie/concept-laser/produkty/>.
- [11] Doplnková výroba (3D tisk kovu). *Renishaw*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/doplnkova-vyroba-3d-tisk-kovu-15239>.
- [12] About EOS. *EOS e-Manufacturing Solutions*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.eos.info/about_eos/history.
- [13] Systems and Equipment – EOSINT M 280. *EOS e-Manufacturing Solutions*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280.
- [14] Systems and Equipment – EOS M 290. *EOS e-Manufacturing Solutions*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.eos.info/eos-m290>.
- [15] Systems and Equipment – EOS M 400. *EOS e-Manufacturing Solutions*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eos_m_400.
- [16] Company. *Concept Laser*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.concept-laser.de/en/home.html>.
- [17] Machines. *Concept Laser*. [online]. 2015 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.concept-laser.de/en/maschinen.html>.
- [18] Systémy pro laserové spékání kovu: Souhrnný katalog Concept Laser. *Misan Obráběcí stroje a nástroje*. [online]. Září 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/concept-laser/Souhrnný_katalog_2015-09.pdf.
- [19] About Renishaw. *Renishaw*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/about-renishaw-6432>.
- [20] Metal additive manufacturing systems-AM250. *Renishaw*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/am250-15253>.

[21] AM250 – stroj pro technologii laser melting (3D tisk kovu). *Renishaw*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/am250-stroj-pro-technologie-laser-melting-3d-tisk-kovu-15253>.

[22] Metal additive manufacturing systems-AM400. *Renishaw*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/am-400-35456>.

[23] RENISHAW PLC. *Renishaw additive manufacturing AM 250 200 W, 400 W, and extendet Z axis: AM 250 Site preparation guide*. UK, 2015.56 s.

[24] Materialise Magics. *Materialise: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2016- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://software.materialise.com/magics>.

[25] Import modules. *Materialise: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2016- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://software.materialise.com/magics-import-modules>.

[26] Structures module. *Materialise: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2016- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://software.materialise.com/magics-structures-module>.

[27] Sinter module. *Materialise: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2016- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://software.materialise.com/magics-sintermodule>.

[28] Materialise Magics 20. *Materialise: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2016- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://software.materialise.com/magics20>.

[29] About CAMbridge. *3Shape dental: Software for Additive Manufacturing*. [online]. © 2014- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.3shapedental.com/restoration/dental-lab/cam-manufacturing/cam-software/>.

[30] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.

- [31] LEANDRI, Alban. A Look into Powder Materials for Metal 3D Printing. *3D Printing industry* [online]. 2015-09-17 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2015/09/17/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing/>.
- [32] Materials for Metal Additive Manufacturing. *EOS e-Manufacturing Solutions*. [online]. 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.eos.info/material-m>.
- [33] DVOŘÁK, Roman. Kovový 3D tisk v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015-02-11 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kovovy-3d-tisk-v-prumyslove-praxi.html>.
- [34] SVOBODA, Ondřej. Aplikace kovového 3D tisku v motosportu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 11-11-2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-kovoveho-3d-tisku-v-motorsportu.html>.
- [35] HALL, Nick. Planes are getting lighter thanks to 3D printing. *3D Printing industry* [online]. 2016-04-25 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2016/04/25/planes-getting-lighter-thanks-3d-printing/>.
- [36] Additive Manufacturing. *GE Aviation*. [online]. © 2015 – [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>.
- [37] Forging-Related Additive Manufacturing News. *FORGE*. [online]. © 2016 – [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.forgemag.com/articles/84384-forging-related-additive-manufacturing-news>.
- [38] Konformní chlazení. *Innomia: Vývoj a výroba plastových a kovových prototypů technologií Rapid Prototyping*. [online]. © 2012- [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazení#doleva>.
- [39] Top 5 3D Printing Applications by Rachel Park. *3D Printing industry*. [online]. 2012-12-29 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2012/12/29/2012-top-5-3d-printing-applications-by-rachel-park/>.